

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - EPR

DIOGO BARROS CORRÊA SÄMY

OPERAÇÃO CARRO-PIPA
OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

BRASÍLIA
2019

DIOGO BARROS CORRÊA SÄMY

OPERAÇÃO CARRO-PIPA
OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Projeto de graduação apresentado' ao curso de Engenharia de Produção da Universidade de Brasília como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel.

BRASÍLIA
2019

DIOGO BARROS CORRÊA SÄMY

OPERAÇÃO CARRO-PIPA
OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Projeto de graduação apresentado' ao curso de Engenharia de Produção da Universidade de Brasília como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel.

Brasília, 4 de julho de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Reinado Crispiniano Garcia, Ph.D., UnB/EPR (Orientador)

Prof. João Mello da Silva, Ph.D., UnB/EPR

BRASÍLIA
2019

RESUMO

A seca na Região Nordeste do Brasil exige medidas públicas para contornar o impacto dessa falta de água nos períodos de estiagem. Uma medida é a Operação Carro-Pipa. Desde 2016, o gasto com esse programa tem sido de pouco mais de R\$ 1 bilhão anual, e o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), instituição que dá suporte a essa operação, encontrou uma oportunidade de redução de custos para o programa. O CENAD verificou que muitas rotas de distribuição apresentavam a entrega de água realizada por um local mais distante do que o necessário e que a roteirização, no geral, poderia ser melhorada. Sendo assim, observou-se a grande melhoria que poderia ser realizada neste processo, encontrando soluções ótimas para a roteirização que havia sido realizada e, também, para outros possíveis cenários de abastecimento. Este trabalho encontra um resultado de economia positiva e satisfatória para a grande maioria dos casos explorados, mas de prejuízo em alguns casos com retirada mínima de pontos referentes a água de rios e açudes. Isso leva ao questionamento tanto da flexibilidade que pode ser aplicada a essa restrição quanto à busca por novas medidas públicas que possam reduzir o custo geral de oferta de água proveniente de outras fontes diferente de rios. De qualquer maneira, pode-se dizer, então, que todos os resultados encontrados reafirmam a necessidade da ferramenta de otimização das rotas de distribuição de água na Operação Carro-Pipa, uma vez que, de modo geral, foram encontradas diversas oportunidades de economia que, para um projeto com um grande volume de orçamento anual, têm um impacto bastante expressivo.

Palavras-chaves: Operação Carro-Pipa, Pesquisa Operacional, Programação Linear, Programação Inteira, MATLAB

ABSTRACT

Drought in the Northeast Region of Brazil requires public measures to overcome the impact of lack of water during this periods of drought. One measure is the Water Truck Operation. Since 2016, spending on this program has been little more than R \$ 1 billion per year, and the National Center for Risk and Disaster Management (CENAD), an institution that supports this operation, has found an opportunity to reduce costs to the program. CENAD found that many distribution routes had deliveries from a farther location than the necessary and that the routing could in general be improved. Thus, it was observed that a great improvement could be made in this process, finding optimal solutions for the routing that had been performed and also for other possible supply scenarios. A positive and satisfactory result was found for the majority of the explored cases, but there was loss in some cases with a minimum withdrawal of points referring to river and weir water. This raises the question of both the flexibility that can be applied to this restriction and the search for new public measures that can reduce the general cost of supplying water from sources other than rivers. In any case, it can be said that all the results found confirm the need for the optimization tool for the water distribution routes in the Water Truck Operation, since, in general, several savings opportunities were found and, for a project with a large annual budget volume, they have a very significant impact.

Palavras-chaves: Water Truck Operation, Operations Research, Linear Programming, Integer Programming, MATLAB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Código em MATLAB (parte 1/3)	46
Figura 2 - Código em MATLAB (parte 2/3)	47
Figura 3 - Código em MATLAB (parte 3/3)	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Seca no Brasil entre 2013 e 2016.....	15
Gráfico 2 - Número de municípios do Nordeste em SE ou ECP	16
Gráfico 3 - Comparação entre os cenários 1, 2 e 3 para o estado do Piauí.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações sobre o Cenário 1 para o município de Quixadá.....	28
Tabela 2 – Informações sobre o Cenário 1 para o estado do Ceará.....	29
Tabela 3 – Informações sobre o Cenário 1 para o estado do Piauí	29
Tabela 4 – Informações sobre o Cenário 2 para o estado do Piauí	31
Tabela 5 – Informações sobre o Cenário 3 para o estado do Piauí	32
Tabela 6 – Resultado do Cenário 1 para o município de Quixadá	34
Tabela 7 – Resultado do Cenário 1 para o estado do Ceará	35
Tabela 8 – Resultado do Cenário 1 para o estado do Piauí.....	35
Tabela 9 – Resultado do Cenário 2 para o estado do Piauí.....	37
Tabela 10 – Resultado do Cenário 3 para o estado do Piauí.....	38
Tabela 11 – Resultado do Cenário 1 para os estados do Ceará e do Piauí.....	40
Tabela 12 – Comparação entre os cenários 1, 2 e 3 para o estado do Piauí.....	40
Tabela 13 – Resultado para o Cenário 1 do município de Quixadá	50
Tabela 14 – Necessidades de entrega para o Cenário 1 do município de Quixadá..	53
Tabela 15 – Capacidades de retirada para o Cenário 1 do município de Quixadá ...	55
Tabela 16 – Distâncias, em metros, para o Cenário 1 do município de Quixadá	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo geral.....	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 Metodologia	11
1.3.1 Definição e delimitação do problema	11
1.3.2 Coleta de dados.....	11
1.3.3 Definição do modelo de solução.....	12
1.3.4 Seleção da plataforma de desenvolvimento	12
1.3.5 Desenvolvimento da ferramenta de solução	12
1.3.6 Validação da ferramenta.....	12
1.3.7 Aplicação da ferramenta	12
1.3.8 Avaliação dos resultados	12
1.4 Estrutura do trabalho	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 A Região Nordeste do Brasil.....	14
2.2 Operação Carro-Pipa.....	16
2.3 Pesquisa Operacional.....	17
2.3.1 Programação linear	18
2.3.2 Problema de roteamento de veículos	20
3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO.....	22
3.1 Definição do método de solução do problema	22
3.2 Modelo geral da ferramenta de solução do problema.....	25
3.3 Divisão em cenários.....	27
3.4 Cenário 1	27
3.4.1 O município de Quixadá	28
3.4.2 O estado do Ceará	28
3.4.3 O estado do Piauí	29
3.5 Cenário 2	30
3.5.1 O estado do Piauí	30
3.6 Cenário 3	31

3.6.1 O estado do Piauí	32
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34
4.1 Cenário 1	34
4.1.1 O município de Quixadá	34
4.1.2 O estado do Ceará	34
4.1.3 O estado do Piauí	35
4.2 Cenário 2	36
4.2.1 O estado do Piauí	37
4.3 Cenário 3	38
4.3.1 O estado do Piauí	38
4.4 Visão geral	39
5 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE A – CÓDIGO EM MATLAB DO MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO	47
APÊNDICE B – RESULTADO PARA O CENÁRIO 1 DO MUNICÍPIO DE QUIXADÁ	50
ANEXO – DADOS RECEBIDOS PARA O CENÁRIO 1 DO MUNICÍPIO DE QUIXADÁ	53

1 INTRODUÇÃO

A seca na Região Nordeste do Brasil exige medidas públicas para contornar o impacto dessa falta de água nos períodos de estiagem. Uma medida é a Operação Carro-Pipa, atualmente realizada através da parceria entre o Ministério do Desenvolvimento Regional e o Exército Brasileiro, em que caminhões-pipa são contratados para transportar água a municípios onde existe uma situação emergencial.

Desde 2016, o gasto com esse programa tem sido de pouco mais de R\$ 1 bilhão anual, e o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), instituição que dá suporte a essa operação, encontrou uma oportunidade de redução de custos para o programa.

O CENAD verificou que muitas rotas de distribuição apresentavam a entrega de água realizada por um local mais distante do que o necessário e que a roteirização, no geral, poderia ser melhorada. Sendo assim, a instituição entrou em contato com a Universidade de Brasília (UnB), a fim de encontrar soluções ótimas para a roteirização que havia sido realizada e, também, para outros possíveis cenários de abastecimento, buscando avaliar a economia que todas essas situações poderiam proporcionar.

Para encontrar essas soluções, foi adotada, dentro da área de conhecimento da Pesquisa Operacional, o método de Programação Linear. Mais especificamente, a Programação Inteira. A integração entre essa ferramenta e o suporte computacional permitiu o alcance de todas as soluções requeridas pelo CENAD.

1.1 Justificativa

Nos últimos anos, os gastos com a Operação Carro-Pipa aumentaram em função do agravamento da seca na Região Nordeste do Brasil. Nos anos de 2016 e 2017, os investimentos foram de cerca de R\$1 bilhão em cada ano (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016; BRASIL, 2017).

Tendo em vista esse crescimento do valor investido, o Ministério da Integração encontrou uma oportunidade de otimização mais precisa do sistema de roteirização da distribuição de água, a fim de promover uma economia ainda maior à Operação Carro-Pipa, tendo em vista os altos valores envolvidos na operação e a atual situação econômica do país.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho apresenta como objetivo geral o desenvolvimento de soluções ótimas para as rotas de abastecimento de água realizadas pela Operação Carro-Pipa, nos estados do Ceará e do Piauí, dados os diferentes cenários de restrições definidos pelo CENAD.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de se alcançar o objetivo geral, traçam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) definir o modelo de solução do problema;
- c) desenvolver a ferramenta de solução para o problema;
- d) aplicar a ferramenta de solução para os casos apresentados.

1.3 Metodologia

Para se alcançar os objetivos deste projeto, foram seguidas algumas etapas, resumidas a seguir.

1.3.1 Definição e delimitação do problema

O problema foi definido e delimitado através de reuniões com o corpo técnico do CENAD, em que foram traçadas as informações que a instituição forneceria para desenvolver a solução do problema abordado.

1.3.2 Coleta de dados

Os dados necessários à resolução do problema foram disponibilizados pelo próprio CENAD, contendo todas as informações necessárias ao desenvolvimento da solução.

1.3.3 Definição do modelo de solução

Ao delimitar o problema e os dados necessários à sua solução, foi desenvolvida a modelagem matemática para se alcançar os objetivos solicitados.

1.3.4 Seleção da plataforma de desenvolvimento

Tendo em vista a modelagem matemática e os dados a serem trabalhados, foi selecionado o software ou código de desenvolvimento mais apropriado.

1.3.5 Desenvolvimento da ferramenta de solução

A ferramenta de solução foi desenhada de acordo com a plataforma de aplicação, considerando-se suas qualidades e limitações.

1.3.6 Validação da ferramenta

Após desenvolvida, a ferramenta foi testada através tanto de iterações dentro do próprio código quando quanto da avaliação preliminar de resultados.

1.3.7 Aplicação da ferramenta

Com a ferramenta desenvolvida e validada, houve sua aplicação para todos os casos relacionados ao projeto.

1.3.8 Avaliação dos resultados

Após a aplicação da ferramenta e a coleta dos resultados, eles foram avaliados, revalidados e comparados, a fim de se concluir sobre a relevância e impacto da solução apresentada.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. O primeiro, Introdução, teve como objetivo proporcionar um breve esclarecimento sobre o contexto e os propósitos deste projeto.

No segundo capítulo, Revisão de Literatura, serão apresentadas informações sobre a situação da Região Nordeste do Brasil e sobre o funcionamento da Operação Carro-Pipa. Haverá, também, uma delimitação da Pesquisa Operacional até o modelo adotado na solução do problema, a Programação Linear Inteira (PLI), e o Problema de Roteamento de Veículos (PRV).

No terceiro capítulo, o Desenvolvimento e Aplicação da Ferramenta de PLI, serão abordadas a escolha do software de desenvolvimento da ferramenta de solução e seu desenvolvimento para cada um dos diferentes cenários de aplicação.

No quarto capítulo, Dados e Discussão, serão apresentados os resultados e suas respectivas avaliações, tanto para cada aplicação quanto para uma visão geral acerca da solução obtida.

No quinto capítulo, Conclusão, serão abordadas as análises e contribuições deste projeto, o fechamento dos resultados, os recursos utilizados e uma proposta para as próximas pesquisas.

Ademais, para apoiar a ilustração do processo de desenvolvimento da solução do problema abordado, este trabalho possui um apêndice e um anexo, que abordam tanto o código utilizado na aplicação do modelo de solução quanto os dados de grande volume relativos ao município de Quixadá. Os dados referentes a todo o estado do Ceará e a todo o estado do Piauí não foram inseridos, uma vez que possuem um volume excessivo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda informações sobre a situação da Região Nordeste do Brasil, o funcionamento da Operação Carro-Pipa e uma delimitação da Pesquisa Operacional até o modelo adotado na solução do problema. Sendo assim, também comenta sobre Programação Linear, Programação Inteira e Problema de Roteamento de Veículos.

2.1 A Região Nordeste do Brasil

O Nordeste é uma região que, pela própria natureza e características geoambientais, requer atenção especial a respeito da oferta de água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017). Apesar de sofrer a influência direta de diversas massas de ar, elas adentram o interior do Nordeste com pouca energia, influenciando, além dos baixos índices de precipitação, a irregularidade das chuvas. O El Niño é outro fenômeno que interfere nos índices de precipitação ao bloquear as frentes frias vindas do sul do país. Ademais, a proximidade da linha do Equador, baixas latitudes e incidência perpendicular dos raios solares sobre a superfície, condicionam à região temperaturas elevadas durante todo ano, além de forte insolação e altas taxas de evapotranspiração (SUASSUNA, 2002).

Em termos geológicos, a região é constituída por duas estruturas básicas: o embasamento cristalino e as bacias sedimentares. Isso influencia diretamente na disponibilidade de água, principalmente as de subsolo. No embasamento cristalino, caracterizado principalmente pela presença de rios temporários, só há duas possibilidades de existência de água no subsolo: em fraturas das rochas e em aluviões próximas a rios e riachos. Contudo essas águas são de volumes finitos e de má qualidade, pois em contato com esse tipo de estrutura, mineralizam-se e tornam-se salinas. Nas bacias sedimentares, além da presença de rios perenes, há significativo volume de água no subsolo. Entretanto, na região Nordeste, esse volume é localizado de forma esparsa, estimando-se que 70% do volume da água do subsolo nordestino esteja localizado na bacia sedimentar do Piauí/Maranhão (SUASSUNA, 2002).

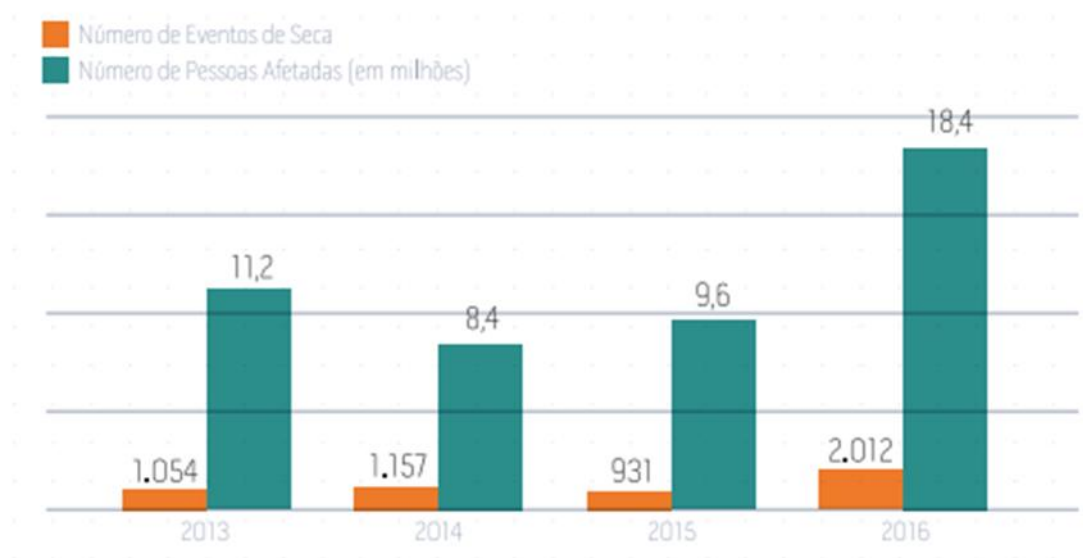
Existe um período de seca bem definido na região, de modo que no norte do Nordeste as chuvas são mais frequentes entre fevereiro e maio, enquanto na parte leste ocorrem entre maio e julho. Entretanto, nos últimos anos, têm-se observado

eventos extremos de escassez. Segundo Martins e Magalhães (2015), entre os anos de 2007 e 2015, pode-se considerar que a região Nordeste teve seis anos secos (2007, 2010, 2012-2015) e três chuvosos (2008, 2009, 2011), apresentando uma média anual de precipitação de 921 mm (MARTINS; MAGALHÃES, 2015).

Os volumes totais de chuvas nos últimos anos têm ficado muito abaixo do esperado na Região Nordeste como um todo, sendo o ano 2012 bastante crítico e o ano de 2014 o mais ameno, porém possuindo em todos os anos ocasiões de extrema seca, o que resultou em reduzidas recargas dos reservatórios existentes. De acordo com o Relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017), dos 204 reservatórios do semiárido, estudados entre 2014 e 2016, apenas 85 reservatórios possuíam a capacidade para atender novas demandas e os 119 restantes operavam no limite de suas capacidades ou já apresentam déficits no atendimento das demandas atuais.

De 2013 a 2016, 48 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens, sendo o ano de 2016 o mais crítico quanto aos impactos sobre a população, no qual ocorreram 2.012 eventos de seca, atingindo 18,4 milhões de pessoas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017).

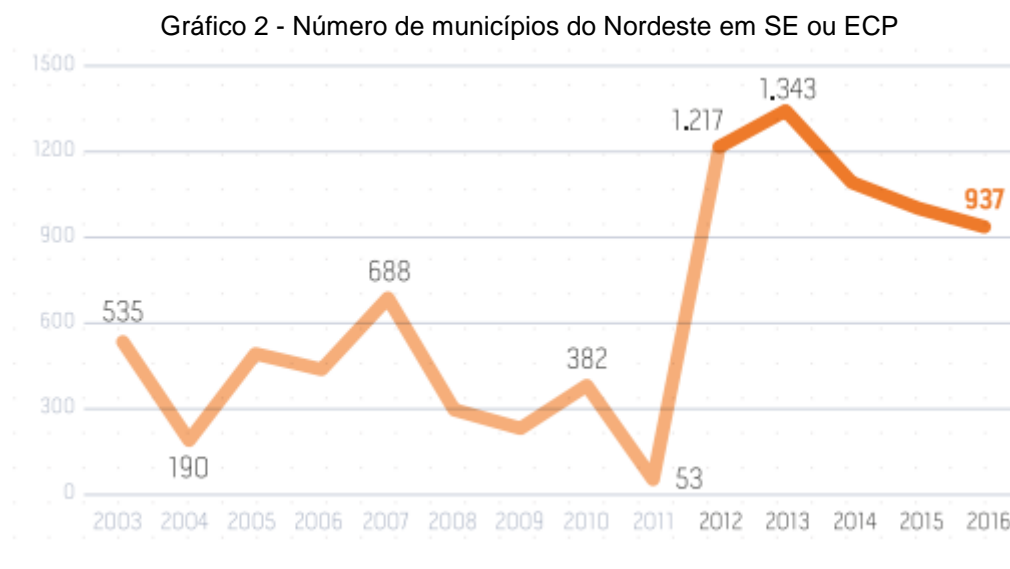
Gráfico 1 - Seca no Brasil entre 2013 e 2016



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017

As estiagens e secas observadas desde 2012 têm prejudicado de forma significativa a oferta de água para abastecimento público e para setores dependentes, como o de energia e o agrícola em todo o país. Entretanto a região Nordeste é a mais

atingida, correspondendo a 83% das secas entre 2013 e 2016. Dos 1.794 municípios da região, 1.409 (78,5%) decretaram Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) devido a secas entre 2003 e 2016. Somente no ano de 2016, 937 municípios decretaram SE ou ECP.



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017

2.2 Operação Carro-Pipa

O Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) é uma instituição coordenada pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). O CENAD possui como objetivos tanto a preparação e resposta a desastres em todo o território nacional, quanto o monitoramento constante de informações sobre possíveis desastres em áreas de risco, visando a redução de impactos e a preparação da população (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019).

A dinâmica de funcionamento do CENAD baseia-se no recebimento de informações de diversos órgãos do governo federal responsáveis pela predição ou relação de fatores climáticos, ambientais, químicos, entre outros. Essas informações são avaliadas e processadas no CENAD e encaminhadas aos órgãos de Proteção e Defesa Civil dos estados e municípios com risco de ocorrência de desastres, de acordo com a intensidade do evento adverso. Em seguida, são realizadas ações de cunho preventivo, mitigatório ou preparatório através de apoio federal (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019).

Sendo assim, uma das atribuições do CENAD é dar suporte à Operação Carro-Pipa (OCP). O antigo Ministério da Integração Nacional, representado pela Secretaria Nacional de Defesa Civil, em parceria com o Ministério da Defesa, representado pelo COTER, criaram tal operação a fim de auxiliar as ações de defesa civil municipais, complementando a distribuição de água realizada pelas prefeituras nas regiões do semiárido brasileiro atingidas pela estiagem. Logo o Ministério do Desenvolvimento Regional distribui água para a população por meio da contratação de caminhões-pipa terceirizados e garante que a água chegue às comunidades rurais que enfrentam a estiagem. Além disso, o Exército Brasileiro realiza uma operação para planejar, coordenar e fiscalizar não somente a busca, mas também o transporte, a desinfecção e a distribuição dessa água potável (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019).

O abastecimento emergencial de água através da OCP atende mensalmente cerca de 4 milhões de pessoas, divididas entre cerca de 900 municípios não somente do semiárido nordestino, mas também da região norte de Minas Gerais e do Espírito Santo. Esse abastecimento se baseia na proporção de 20 litros diários de água por pessoa e, para executar a logística, quase 7 mil pipeiros fazem parte do programa e atuam em aproximadamente 80 mil pontos de abastecimento e cisternas coletivas (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016).

Nos últimos 6 anos, os gastos com a OCP aumentaram em função do agravamento da seca. Em 2012, foram aplicados cerca de R\$450 milhões e, em 2013, R\$700 milhões. No ano seguinte, foram investidos R\$850 milhões e, em 2015, R\$920 milhões. Nos anos de 2016 e 2017, os investimentos foram de cerca de R\$1 bilhão em cada ano (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2016; BRASIL, 2017).

Tendo em vista esse crescimento do valor investido, o Ministério da Integração encontrou uma oportunidade de otimização mais precisa do sistema de roteirização da distribuição de água, a fim de promover uma economia ainda maior à OCP. Observou-se assim a possibilidade de obter grandes economias, tendo em vista os altos valores envolvidos na operação e a atual situação econômica do país.

2.3 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional (PO) envolve "pesquisa sobre operações". Sendo assim, é aplicada a problemas envolvendo a condução e coordenação das operações

em uma organização. A PO tem sido largamente aplicada em áreas como manufatura, transportes, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, assistência médica, militar e serviços públicos, com uma gama de aplicações extremamente variada (HILLIER e LIEBERMAN, 2006, p. 2).

A Pesquisa Operacional usa uma abordagem similar às pesquisas em campos científicos usuais, uma vez que o método científico é utilizado para investigar o problema. O processo tem seu início com a observação e formulação do problema, incluindo a coleta de dados relevantes. A próxima etapa é construir um modelo científico, tipicamente matemático, que visa abstrair a essência do problema real. Sendo assim, parte-se da hipótese de que o modelo é uma representação suficientemente precisa das características essenciais da situação e de que as conclusões obtidas também são válidas para o problema real. Em seguida, são realizadas experimentações adequadas para testar essa hipótese, modificá-la conforme necessário e, eventualmente, validar o modelo (HILLIER e LIEBERMAN, 2006, p. 2).

Uma característica adicional é que a PO tenta, frequentemente, encontrar (pelo menos) uma solução ótima para o problema considerado. Em vez de simplesmente melhorar o status quo, o objetivo é identificar o melhor caminho a ser seguido (HILLIER e LIEBERMAN, 2006, p. 3).

2.3.1 Programação linear

A programação linear é uma das abordagens da Pesquisa Operacional que envolvem um modelo matemático para alcançar a solução do problema. O adjetivo “linear” significa que todas as funções matemáticas nesse modelo são necessariamente funções lineares. A palavra “programação”, nesse caso, não é adotada como uma referência à programação computacional e sim como um sinônimo para “planejamento” (HILLIER e LIEBERMAN, 2006, p. 25).

Dantzig e Thapa (1997) definem programação linear como uma relação de maximização ou minimização de uma função objetivo linear em várias variáveis, sujeita a restrições de igualdade e de desigualdade.

Sendo assim, a programação linear envolve o planejamento de atividades para obter pelo menos um resultado ótimo, isto é, pelo menos um resultado que atinja o melhor objetivo especificado, entre todas as alternativas viáveis. Ademais, qualquer

problema cujo modelo matemático se encaixe no formato bem genérico para o modelo de programação linear é um problema de programação linear. (HILLIER e LIEBERMAN, 2006, p. 25).

De maneira geral, um problema de programação linear pode ser descrito da seguinte maneira (DANTZIG e THAPA, 1997; HILLIER e LIEBERMAN, 2006):

$$\text{Maximizar ou minimizar } Z = C^T \cdot x \quad (1)$$

Sujeito a:

$$A \cdot x \leq B \quad (2)$$

$$M \cdot x = N \quad (3)$$

Em que:

- a) Z representa a função objetivo, em que se deseja encontrar um valor máximo ou mínimo, dependendo do caso adotado;
- b) x representa um vetor de dados equivalente às variáveis da solução do problema abordado;
- c) C^T representa um vetor de dados equivalente à associação entre as variáveis da solução para se alcançar a função objetivo;
- d) A representa um vetor de dados equivalente à associação entre as variáveis da solução para se obedecer às restrições de desigualdade do problema;
- e) B representa um vetor de dados equivalente às restrições de desigualdade a serem atendidas;
- f) M representa um vetor de dados equivalente à associação entre as variáveis da solução para se obedecer às restrições de igualdade do problema;
- g) N representa um vetor de dados equivalente às restrições de igualdade a serem atendidas;

2.3.1.1 Programação Inteira

Em muitos problemas práticos, as variáveis de decisão, na verdade, fazem sentido apenas se elas tiverem valores inteiros. Por exemplo, normalmente é

necessário alocar pessoal, máquinas e veículos a atividades em quantidades inteiras. Se a exigência de valores inteiros for a única maneira pela qual um problema se afasta da formulação de programação linear, então se trata de um problema de programação inteira (PI) (TAHA, 2011).

O modelo matemático para programação inteira é o mesmo modelo de programação linear, apenas com uma restrição adicional de que as variáveis devem ser valores inteiros. Se apenas algumas variáveis tiverem de ter valores inteiros (de modo que a hipótese da divisibilidade permaneça válida para as demais), esse modelo é denominado programação inteira mista (PIM). Ao fazer a distinção entre problema o caso misto e o caso com apenas variáveis inteiras, este último acaba denominado por programação inteira pura (WINSTON, 2004).

2.3.2 Problema de roteamento de veículos

O problema de roteamento de veículos (PRV) é um dos mais estudados problemas na área da otimização combinatória. Consiste no atendimento de um conjunto de consumidores por intermédio de uma frota de veículos, que partem de um ou mais pontos denominados depósitos. O PRV, apesar do seu enunciado relativamente simples, apresenta elevada complexidade computacional. Na literatura científica, Dantzig e Ramser foram os primeiros autores a formular o PRV. Em 1959, estudaram a aplicação real na distribuição de gasolina para estações de venda de combustíveis — os postos de gasolina (Dantzig e Ramser, 1959).

A função objetivo do PRV depende da tipologia e das características do problema. Os mais comuns incluem minimizar o custo total da operação, minimizar o tempo total de transporte, minimizar a distância total percorrida, minimizar o tempo de espera, maximizar o benefício, maximizar o serviço ao cliente, minimizar a utilização de veículos e equilibrar a utilização dos recursos.

Os problemas de roteamento de veículos têm sido ainda estudados com muito interesse nas últimas décadas. O foco no estudo desta classe de problema se deve à necessidade da diminuição de gastos em todo o processo que engloba desde a produção de uma mercadoria até sua venda. Pesquisas indicam, por exemplo, que um considerável percentual do valor da mercadoria que chega aos clientes é de exclusiva responsabilidade dos gastos obtidos através de sua distribuição. Este valor é estimado no intervalo de 10% a 15% do preço dos produtos. Um dos objetivos das

pesquisas em torno dos PRVs é reduzir este percentual de gastos com transporte a um nível mais satisfatório, possibilitando reduções de preço nos produtos finais.

Basicamente, esses problemas se resumem ao atendimento de uma demanda, que pode se apresentar na forma de coleta e/ou entrega de pessoas ou mercadorias (no caso deste projeto, a água em uma determinada região geográfica ou espacial). A maioria das aplicações do PRV são geográficas e representadas por consumidores distribuídos em uma área de atendimento. Dessa maneira, o objetivo dos pesquisadores é desenvolver metodologias de atendimento às demandas do PRV de forma otimizada, visando a redução dos gastos com veículos ou com o deslocamento dos mesmos. Diversos trabalhos têm sido publicados, levando em consideração os diferentes problemas de roteamento de veículos, incluindo trabalhos que envolvem a capacidade dos veículos, horário de coletas ou de entregas de mercadorias, diferentes capacidades dos veículos, entre outros fatores (FRAZZOLI e BULLO, 2004; OLIVEIRA e VASCONCELOS, 2008; PSARAFTIS, 1988).

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO

Este capítulo aborda a definição do método de solução, a escolha do software de desenvolvimento e explica a divisão do problema em cenários de aplicação. São apresentadas, também, as condições de cada cenário.

3.1 Definição do método de solução do problema

O presente problema consiste em reduzir os custos com a Operação Carro-Pipa através de uma solução ótima de roteirização. Deve-se levar em consideração que esses custos são diretamente proporcionais à distância total percorrida pelos caminhões-pipa entre os pontos de retirada de água e os pontos de abastecimento. Portanto é possível inferir que tal solução ótima será obtida com a minimização dessa distância total percorrida na operação.

Ademais, esse problema possui como restrições o fato de que cada ponto de retirada de água possui um limite máximo de retiradas e que cada ponto de abastecimento possui uma quantidade exata de entregas a serem recebidas.

Por fim, outra restrição delimitada pelo CENAD, que apresenta bastante implicação no método de solução, é o fato de que cada ponto de abastecimento deve ter suas entregas realizadas por apenas um ponto de retirada. Dessa maneira, não é possível a existência de um caso em que um ponto de abastecimento possua entregas realizadas por dois ou mais pontos de retirada.

Tendo em vista essa última restrição e sabendo que a demanda de cada ponto de abastecimento e a capacidade de oferta de cada ponto de retirada são contabilizadas dentro do conjunto dos números inteiros, é possível verificar que esse caso de problema de roteamento de veículos é melhor resolvido através da Programação Inteira.

Sendo assim, para resolver o problema a partir desse método, foram utilizadas três informações:

- a) todos os pontos de retirada de água, com suas respectivas capacidades de retirada;
- b) todos os pontos de abastecimento, com suas respectivas necessidades de entrega;

c) a distância entre cada ponto de retirada de água e cada ponto de abastecimento.

Com isso, para I pontos de retirada de água e J pontos de abastecimento, o problema apresentado pode ser definido através da seguinte formulação de Programação Linear Inteira:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{distancias}_{i,j} \cdot \text{entregas}_j \cdot x_{i,j} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \text{entregas}_j \cdot x_{1,j} &\leq \text{capacidade}_1 \\ &\vdots \\ \sum_{j=1}^J \text{entregas}_j \cdot x_{I,j} &\leq \text{capacidade}_I \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I x_{i,1} &= 1 \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^I x_{i,J} &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$0 \leq x_{i,j} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in \{(1,1), \dots, (1,J), (2,1), \dots, (2,J), \dots, (I,1), \dots, (I,J)\} \quad (7)$$

$$x_{i,j} \in \mathbb{Z} \quad \forall (i,j) \in \{(1,1), \dots, (1,J), (2,1), \dots, (2,J), \dots, (I,1), \dots, (I,J)\} \quad (8)$$

Em que:

- a) Z é a distância total realizada por todas as entregas em cada caso analisado;
- b) $\text{distancias}_{i,j}$ representa a distância entre o ponto de retirada i e o ponto de abastecimento j ;
- c) entregas_j representa o número de entregas solicitadas pelo ponto de abastecimento j ;

- d) $x_{i,j}$ representa uma relação entre o ponto de retirada i e o ponto de abastecimento j , que possui o valor:
- 1, caso a entrega seja realizada entre os dois pontos;
 - 0, caso contrário.
- e) $capacidade_i$ representa a capacidade de entregas do ponto de retirada i .

Outra maneira de modelar o mesmo problema pode ser dada por:

$$\text{Minimizar } Z = f^T \cdot x \quad (9)$$

Sujeito a:

$$A \cdot x \leq B \quad (10)$$

$$Aeq \cdot x = Beq \quad (11)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (12)$$

$$x(k) \in \mathbb{Z} \forall k \in \{1, 2, 3, \dots, I \cdot J\} \quad (13)$$

Em que:

- a) Z é a distância total realizada por todas as entregas em cada caso analisado;
- b) f é uma matriz do tipo vetor coluna, de $i \cdot j$ elementos, e cada elemento representa a associação de um ponto de retirada de água com um ponto de abastecimento. Dessa maneira, o valor de cada elemento é dado pelo produto da distância entre os dois pontos associados com a quantidade de entregas de água que o ponto de abastecimento abordado necessita;
- c) f^T é a matriz transposta de f ;
- d) x é uma matriz do tipo vetor coluna, de $i \cdot j$ elementos, e cada elemento representa a associação de um ponto de retirada de água com um ponto de abastecimento, sendo todas as associações possíveis abordadas e o valor de cada elemento dado por:
- 1, caso haja entrega realizada entre os dois pontos;
 - 0, caso contrário.
- e) A é uma matriz de i linhas (cada uma representando um ponto de retirada de água) e $i \cdot j$ colunas (cada uma representando uma associação de um

ponto de retirada de água com um ponto de abastecimento), em que cada elemento representa:

- a quantidade de entregas necessárias para o ponto de abastecimento abordado na coluna, caso os pontos de retirada de água abordados na linha e na coluna sejam o mesmo;
- 0, caso contrário.

f) B é uma matriz do tipo coluna, de i elementos, em que cada elemento representa a quantidade máxima de retiradas que podem ser realizadas de determinado ponto de retirada;

g) Aeq é uma matriz de j linhas (cada uma representando um ponto de abastecimento) e $i \cdot j$ colunas (cada uma representando uma associação de um ponto de retirada de água com um ponto de abastecimento), em que cada elemento representa o valor:

- 1, caso os pontos de abastecimento abordados na linha e na coluna sejam o mesmo;
- 0, caso contrário.

h) Beq é uma matriz do tipo coluna, de j elementos, em que cada elemento representa o valor 1;

i) lb é uma matriz nula do tipo linha, de $i \cdot j$ elementos;

j) ub é uma matriz do tipo linha, de $i \cdot j$ elementos, em que cada elemento representa o valor 1.

Com isso o próximo passo do projeto foi aplicar esse método para cada mês do período de tempo considerado nos casos desenvolvidos e, através da comparação entre as roteirizações de fato realizadas e as roteirizações ótimas, calcular a economia que poderia ter sido proporcionada tanto em cada mês quanto no geral.

3.2 Modelo geral da ferramenta de solução do problema

De maneira geral, para resolver o problema, foi desenvolvido um código no MATLAB que pudesse resolver qualquer um dos casos tratados, assim como possíveis casos futuros que o próprio CENAD quisesse analisar. O software escolhido para implantar o modelo foi o MATLAB, devido à sua ótima funcionalidade tanto em relação à manipulação de vetores e matrizes, quanto à resolução de problemas de otimização (MATHWORKS, 2019).

Desse modo, a fim de promover um programa acessível, de simples utilização, para cada mês de cada localidade, o programa recebia quatro arquivos do tipo *.txt* e produzia dois arquivos de mesma extensão.

Os quatro arquivos *.txt* de entrada são:

a) “atual”, constituído por uma relação de duas colunas de dados, de modo que a primeira coluna lista todos os códigos referentes aos pontos de abastecimento de água envolvidos na localidade e mês especificados, enquanto a segunda coluna relaciona os respectivos pontos de abastecimento de água de onde de fato foi realizada a entrega;

b) “demanda”, constituído por uma relação de duas colunas de dados, de modo que a primeira coluna lista todos os códigos referentes aos pontos de abastecimento de água envolvidos na localidade e mês especificados, enquanto a segunda coluna relaciona as respectivas necessidades de entrega;

c) “oferta”, constituído por duas colunas de dados, em que a primeira coluna lista todos os códigos referentes aos pontos de retirada de água envolvidos na localidade e mês especificados, enquanto a segunda coluna relaciona as respectivas capacidades de entrega;

d) “distancias”, constituído por uma relação matricial, em que as colunas representam os pontos de abastecimento de água e as linhas, os pontos de retirada, de modo que a cada elemento seja atribuída a distância entre os dois pontos relativos à respectiva linha e coluna.

Já os dois arquivos de saída são:

a) “resultado”, constituído por uma relação de duas colunas de dados, de modo que a primeira coluna lista todos os códigos referentes aos pontos de demanda de água envolvidos na localidade e mês especificados, enquanto a segunda coluna relaciona os respectivos pontos de abastecimento de água que proporcional a solução ótima de roteirização;

b) “economia”, constituído pela relação da distância total relacionada às entregas de fato realizadas na localidade e mês especificados, pela distância total otimizada para o respectivo caso e pela economia que poderia ter sido realizada no mês.

3.3 Divisão em cenários

Para todos os casos, foram atribuídos os valores e as ocorrências que de fato ocorreram em cada determinada localidade e determinado mês aos pontos de abastecimento e suas respectivas quantidades necessárias de entrega. Portanto, dentro de cada localidade e dentro de cada mês, existe uma única relação de pontos de abastecimento e necessidades de entrega. Dessa maneira, pode haver meses em que determinada localidade não necessite mais de água, devido a chuvas que caíram em sua região, por exemplo.

A distância entre cada ponto de retirada de água e cada ponto de abastecimento também é invariável para todos os casos desenvolvidos.

A diferença pode ocorrer nos pontos de retirada de água e de abastecimento. Sendo assim, o CENAD dividiu a relação de pontos de retirada de água e capacidade de retirada em três cenários.

No primeiro cenário, para cada localidade e cada mês, o CENAD forneceu como pontos de retirada e suas possíveis capacidades de retirada as ocorrências que de fato ocorreram em cada caso, com a única diferença de tornar ilimitada a quantidade de retiradas dos pontos correspondentes a água de rio.

No segundo cenário, que foi exclusivo do estado do Piauí, foi levantada pelo CENAD apenas uma relação de pontos de retirada de água e capacidade, a ser aplicada para todos os meses, de modo que foram considerados todos os pontos possíveis de abastecimento e uma capacidade calculada tanto pela média dos meses considerados quanto por outros fatores requeridos pelo próprio CENAD.

Já no terceiro cenário, também exclusivo do Piauí, foi mantida a relação desenvolvida no segundo cenário, mas com duas pequenas mudanças. Uma mudança foi a adição de uma nova restrição ao problema, de modo que só fosse retirada água dos rios e açudes nas situações em que as estações de tratamento de água (ETAs) não fossem suficientes para atender à demanda. Caso as ETAs não fossem capazes de suprir toda a demanda, essa escassez seria fornecida pelos rios e açudes. A outra mudança foi a limitação dos pontos de abastecimento referentes aos rios e açudes, de modo que para determinado mês, seriam considerados como utilizáveis apenas os pontos que de fato já haviam tido água retirada nesse mês.

3.4 Cenário 1

No primeiro cenário, como já mencionado, para cada localidade e cada mês, os pontos de retirada de água e suas capacidades de retirada foram designados pelas ocorrências que de fato ocorreram em cada caso, com a única diferença de tornar-se ilimitada a quantidade de retiradas dos pontos correspondentes a água de rio.

Ademais, esse cenário foi aplicado tanto ao município de Quixadá quanto a todo o estado do Ceará e todo o estado do Piauí. Uma síntese dos dados relativos à implementação de cada caso está representada nas tabelas 1 a 5 e os valores detalhados de cada caso são dados nos anexos e apêndices deste trabalho.

3.4.1 O município de Quixadá

Para Quixadá, foi avaliado somente um mês, pois esse município foi utilizado como projeto piloto para o problema. A tabela 1 relaciona a quantidade de pontos de abastecimento, a quantidade total de entregas a serem realizadas e a quantidade total de pontos de retirada.

Tabela 1 – Informações sobre o Cenário 1 para o município de Quixadá		
Nº de pontos de abastecimento	Nº total de entregas	Nº de pontos de retirada
229	671	3

Fonte: O AUTOR

3.4.2 O estado do Ceará

Para o estado do Ceará, foi considerado também apenas um mês, com o objetivo de dar procedência à otimização do programa e avaliar o tempo computacional necessário à solução do problema. Um tempo computacional bastante elevado, por exemplo, levaria à necessidade de aplicação de matrizes esparsas no modelo utilizado. A tabela 2 abaixo relaciona a quantidade de pontos de abastecimento, a quantidade total de entregas e a quantidade total de pontos de retirada.

Tabela 2 – Informações sobre o Cenário 1 para o estado do Ceará

Nº de pontos de abastecimento	Nº total de entregas	Nº de pontos de retirada
4.599	12.126	36

Fonte: O AUTOR

3.4.3 O estado do Piauí

Já para o estado do Piauí, no primeiro cenário, foi realizada a otimização das rotas de abastecimento não somente para um mês, mas para todos os meses do ano de 2017 e os meses de janeiro a julho de 2018. A tabela 3 abaixo relaciona a quantidade de pontos de abastecimento, quantidade de pontos de retirada de água e a quantidade total de entrega em cada caso.

Sendo assim, observou-se a dinamicidade do problema, em que a ocorrência ou não de chuvas e fatores como a possível quebra de uma estação de tratamento de água, por exemplo, pode mudar a necessidade de entregas e os possíveis pontos de abastecimento e de retirada.

Tabela 3 – Informações sobre o Cenário 1 para o estado do Piauí

Ano	Mês	Nº de pontos de abastecimento	Nº total de entregas	Nº de pontos de retirada
2017	Janeiro	1.952	3.933	66
	Fevereiro	945	1.665	53
	Março	1.827	3.384	53
	Abril	2.066	4.036	49
	Maio	3.195	7.033	62
	Junho	4.294	10.826	66
	Julho	5.110	13.953	61
	Agosto	5.280	14.431	59
	Setembro	5.794	16.087	60
	Outubro	5.681	15.146	61
	Novembro	5.696	14.979	64
	Dezembro	5.646	14.590	54

Continua

Ano	Mês	Nº de pontos de abastecimento	Nº total de entregas	Nº de pontos de retirada
2018	Janeiro	5.746	15.093	61
	Fevereiro	5.396	14.219	56
	Março	2.689	6.586	28
	Abril	1.798	3.626	18
	Maior	2.662	5.540	35
	Junho	1.325	2.758	9
	Julho	1.431	2.908	12

Fonte: O AUTOR

3.5 Cenário 2

No segundo cenário, também já mencionado anteriormente, foi levantada pelo CENAD apenas uma nova relação de pontos de retirada de água e capacidade, a ser aplicada para cada um dos meses, de modo que foram reconsiderados os pontos possíveis de retirada e a capacidade foi calculada tanto pela média de todos os meses considerados quanto por outros fatores requeridos pelo próprio CENAD. Por exemplo, se uma estação de tratamento de água havia fornecido duas entregas em um mês, mas em todos os outros meses do ano ela mostrou uma possível capacidade de pelo menos cem retiradas, assumiu-se que sua real capacidade é de cem retiradas para todos os meses do ano.

Ademais, esse cenário foi aplicado somente ao estado do Piauí, devido à complexidade de implementá-lo, e os dados relativos ao número de pontos de retirada para cada caso serão resumidos a seguir. Os valores específicos de cada caso, entretanto, estão retratados nos anexos e apêndices deste trabalho.

Como a mudança em relação ao Cenário 1 foi apenas a relação dos pontos de retirada e suas capacidades, o código no MATLAB manteve-se o mesmo do Cenário 1, com mudança apenas no arquivo *.txt* de entrada para a oferta.

3.5.1 O estado do Piauí

Para o estado do Piauí, no segundo cenário, foi realizada a otimização das rotas de abastecimento também para todos os meses do ano de 2017. Exceto pela alteração dos pontos de retirada e suas respectivas capacidades, todos os outros valores mantiveram-se os mesmos do Cenário 1. A tabela 4 abaixo relaciona a nova quantidade de pontos de retirada para cada um dos casos.

Tabela 4 – Informações sobre o Cenário 2 para o estado do Piauí		
Ano	Mês	Nº de pontos de retirada
2017	Janeiro	66
	Fevereiro	51
	Março	52
	Abril	47
	Maio	61
	Junho	64
	Julho	59
	Agosto	58
	Setembro	58
	Outubro	58
	Novembro	62
	Dezembro	52

Fonte: O AUTOR

3.6 Cenário 3

No terceiro cenário, também exclusivo do Piauí, foi mantida a relação desenvolvida no segundo cenário, mas com duas pequenas mudanças. Uma mudança foi a adição de uma nova restrição ao problema, de modo que só fosse retirada água dos rios e açudes nas ocorrências em que as estações de tratamento de água (ETAs) não fossem suficientes para atender à demanda. Caso isso acontecesse, seria retirada dos rios somente a diferença entre a demanda e a capacidade total de abastecimento das ETAs. Essa restrição deve-se ao fato de que a água proveniente dos rios e açudes não possui a mesma qualidade da água

proveniente das ETAs, pois a falta de tratamento adequado pode permitir a presença de contaminantes que afetam a saúde da população abastecida.

A outra mudança foi a limitação dos pontos de retirada referentes aos rios, de modo que para determinado mês, seriam considerados como utilizáveis apenas os rios que de fato já haviam tido água retirada nesse mês.

3.6.1 O estado do Piauí

Para o estado do Piauí, no terceiro cenário, foi realizada a otimização das rotas de abastecimento somente para os doze meses do ano de 2017, assim como no cenário 2. Exceto pela alteração dos pontos de retirada e suas respectivas capacidades, todos os outros valores mantiveram-se os mesmos do Cenário 1 e do Cenário 2.

Para os pontos de retirada, empregaram-se em todos os meses as mesmas estações de tratamento de água, com as mesmas capacidades de retiradas, de modo que a diferença entre cada mês se dava apenas pelos pontos referentes aos rios e açudes.

A tabela 5 abaixo relaciona a nova quantidade de pontos de retirada para cada um dos meses de 2017.

Tabela 5 – Informações sobre o Cenário 3 para o estado do Piauí		
Ano	Mês	Nº de pontos de retirada
2017	Janeiro	79
	Fevereiro	79
	Março	79
	Abril	79
	Maior	79
	Junho	79
	Julho	81
	Agosto	81
	Setembro	81
	Outubro	82
Continua		

Ano	Mês	Nº de pontos de retirada
2017	Novembro	81
	Dezembro	81

Fonte: O AUTOR

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O programa foi rodado para cada um dos casos mencionados no capítulo anterior, sob as condições especificadas, e serão apresentados nas seções seguintes tanto um resumo dos resultados quanto suas respectivas avaliações.

4.1 Cenário 1

Este cenário, conforme já explicado, teve aplicação para o município de Quixadá, para o estado do Ceará e para o estado do Piauí.

4.1.1 O município de Quixadá

Para o município de Quixadá, a otimização foi realizada apenas em um mês de ocorrência e o resultado segue na tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Resultado do Cenário 1 para o município de Quixadá

Distância total realizada (km)	Distância total otimizada (km)	Economia absoluta (km)	Economia relativa
22.162	16.136	6.027	27,2%

Fonte: O AUTOR

É possível observar que a otimização proporcionou uma economia elevada e, mesmo que o caso de um município não necessariamente represente todo o estado do Ceará ou a própria Região Nordeste, essa economia já é suficiente para justificar a necessidade de um estudo aprofundado não somente sobre o restante do estado do Ceará, mas também sobre o restante do Nordeste.

Um maior detalhamento dos dados utilizados e obtidos na aplicação da ferramenta de otimização para esse caso está especificado no apêndice e anexo deste trabalho.

4.1.2 O estado do Ceará

Para o estado do Ceará, a otimização foi realizada também em apenas um mês de ocorrência e o resultado segue na tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Resultado do Cenário 1 para o estado do Ceará

Distância total realizada (km)	Distância total otimizada (km)	Economia absoluta (km)	Economia relativa
1.085.602	1.018.335	67.267	6,2%

Fonte: O AUTOR

Nota-se que a economia para o estado do Ceará não foi tão acentuada quanto no caso do município de Quixadá, mostrando que a roteirização para o atendimento desse município estava mais desornada que a média para todo o estado.

Entretanto o resultado para o estado do Ceará não deixa de ser um valor considerável, tendo em vista que a Operação Carro-Pipa se trata de um projeto cujo orçamento anual é da ordem de R\$ 1 bilhão. Caso toda a Região Nordeste apresentasse o mesmo percentual de economia que o caso apresentado do estado do Ceará, a economia anual seria da ordem de R\$ 62 milhões. Além disso, o estado do Ceará é o mais oneroso para a operação, consumindo cerca de R\$ 250 milhões ao ano. Uma possível economia de 6% representaria uma redução direta de aproximadamente R\$ 15 milhões no orçamento anual da Operação Carro-Pipa.

4.1.3 O estado do Piauí

Para o estado do Piauí, a otimização no caso do Cenário 1 foi realizada para um intervalo de dezenove meses, de janeiro de 2017 a julho de 2018. O resultado é dado na tabela 8 abaixo.

Tabela 8 – Resultado do Cenário 1 para o estado do Piauí

Ano	Mês	Distância total realizada (10 ³ km)	Distância total otimizada (10 ³ km)	Economia absoluta (10 ³ km)	Economia relativa
2017	Janeiro	2.756	2.605	151	5,5%
	Fevereiro	1.147	1.101	46	4,0%
	Março	2.453	2.375	77	3,1%
	Abril	2.963	2.890	73	2,5%
	Maio	5.078	4.923	155	3,1%

Continua

Ano	Mês	Distância total realizada (10 ³ km)	Distância total otimizada (10 ³ km)	Economia absoluta (10 ³ km)	Economia relativa
2017	Junho	7.772	7.407	366	4,7%
	Julho	10.641	9.828	813	7,6%
	Agosto	11.159	10.318	841	7,5%
	Setembro	12.492	11.546	946	7,6%
	Outubro	11.931	10.981	950	8,0%
	Novembro	10.882	8.462	2.420	22,2%
	Dezembro	10.451	8.240	2.211	21,2%
2018	Janeiro	10.829	8.531	2.298	21,2%
	Fevereiro	9.938	7.984	1.955	19,7%
	Março	4.170	3.061	1.109	26,6%
	Abril	2.442	2.257	185	7,6%
	Maio	3.579	3.467	112	3,1%
	Junho	1.974	1.810	164	8,3%
	Julho	2.185	1.959	227	10,4%
Total		124.843	109.745	15.098	12,1%

Fonte: O AUTOR

Com um intervalo maior de tempo, é possível obter um resultado mais preciso acerca das potenciais economias para a Operação Carro-Pipa. No estado do Piauí, observou-se que, ao longo de todos os meses abordados, a economia proveniente da otimização das roteirizações teve um valor considerável. Isso revela a importância do estudo sobre a otimização das roteirizações no planejamento das rotas de abastecimento da operação.

Ademais, o resultado para o estado do Piauí foi ainda mais satisfatório do que para o estado do Ceará, sugerindo que o projeto pode promover uma economia percentual maior para toda a Região Nordeste do que a obtida apenas para o estado do Ceará.

4.2 Cenário 2

Este cenário foi considerado somente para o estado do Piauí e teve seu horizonte de aplicação dado no intervalo de doze meses, referentes a todo o ano de 2017.

4.2.1 O estado do Piauí

Para o estado do Piauí, no segundo cenário, a otimização foi realizada para os doze meses do ano de 2017. O resultado segue na tabela 9.

Tabela 9 – Resultado do Cenário 2 para o estado do Piauí

Ano	Mês	Distância total realizada (10 ³ km)	Distância total otimizada (10 ³ km)	Economia absoluta (10 ³ km)	Economia relativa
2017	Janeiro	2.756	2.171	585	21,2%
	Fevereiro	1.147	876	271	23,6%
	Março	2.453	1.826	627	25,6%
	Abril	2.963	2.472	491	16,6%
	Maio	5.078	4.203	875	17,2%
	Junho	7.772	6.959	814	10,5%
	Julho	10.641	9.649	992	9,3%
	Agosto	11.159	10.194	964	8,6%
	Setembro	12.492	6.905	5.587	44,7%
	Outubro	11.931	10.268	1.663	13,9%
	Novembro	10.882	8.033	2.849	26,2%
	Dezembro	10.451	7.984	2.467	23,6%
Total		89.725	71.542	18.183	20,3%

Fonte: O AUTOR

Nota-se que a economia total desenvolvida no Cenário 2 teve um resultado melhor que o Cenário 1, demonstrando que uma maior versatilidade na escolha dos pontos de retirada de água permite uma oportunidade para o desenvolvimento de rotas mais otimizadas.

É possível observar, também, que o resultado do Cenário 2 novamente fomentou a necessidade de atenção às roteirizações da Operação Carro-Pipa,

indicando que as otimizações podem levar a um impacto bastante expressivo na redução de custos do projeto.

4.3 Cenário 3

Este cenário, conforme já explicado, foi considerado somente para o estado do Piauí e teve seu horizonte de aplicação dado no intervalo de doze meses, referentes a todo o ano de 2017.

4.3.1 O estado do Piauí

Assim como no segundo cenário, o terceiro cenário teve a otimização realizada somente para os doze meses do ano de 2017. O resultado segue na tabela 10 abaixo.

Tabela 10 – Resultado do Cenário 3 para o estado do Piauí

Ano	Mês	Distância total realizada (10 ³ km)	Distância total otimizada (10 ³ km)	Economia absoluta (10 ³ km)	Economia relativa
2017	Janeiro	2.756	2.229	526	19,1%
	Fevereiro	1.147	945	201	17,5%
	Março	2.453	1.945	508	20,7%
	Abril	2.963	2.634	329	11,1%
	Maio	5.078	4.401	678	13,3%
	Junho	7.772	7.372	400	5,1%
	Julho	10.641	11.419	-777	-7,3%
	Agosto	11.159	12.751	-1.592	-14,3%
	Setembro	12.492	18.204	-5.712	-45,7%
	Outubro	11.931	15.648	-3.718	-31,2%
	Novembro	10.882	9.125	1.758	16,2%
	Dezembro	10.451	8.846	1.605	15,4%
Total		89.725	95.519	-5.794	-6,5%

Fonte: O AUTOR

Dessa vez, a economia total desenvolvida não foi satisfatória. Isso se deve basicamente a um intervalo de quatro meses do ano de 2017 — julho a outubro —, em que as distâncias otimizadas apresentaram valores maiores do que as de fato realizadas. Entretanto esse não é um resultado inesperado.

A proposta é de reduzir as retiradas de pontos referentes a rios e açudes para a quantidade mínima necessária à integralização da demanda, utilizando-se, prioritariamente, a capacidade total de todas as estações de tratamento de água. Sendo assim, é de se esperar que, em alguns casos, o fato de evitar que as entregas sejam realizadas com água proveniente de rios e açudes proporcione um aumento de distância nas roteirizações. E isso de fato ocorreu para os meses de julho a outubro de 2017.

O que justifica o impacto negativo tão acentuado nesse intervalo de tempo é uma situação específica de grande aumento na demanda para pontos de abastecimento que se encontram mais próximos de rios ou açudes do que de estações de tratamento. Dessa maneira, a ponderação entre o volume de entrega para essas localidades e o aumento na distância de entrega para esse cenário levou a um impacto notável até mesmo para a roteirização geral de todo o estado do Piauí.

De qualquer maneira, nos outros oito meses do ano foi encontrada uma economia considerável, mesmo com a restrição relativa aos pontos de retirada. Enquanto para os meses de piora na economia o aumento médio das distâncias foi de aproximadamente 25,5%, os meses que apresentaram um resultado positivo de economia tiveram como média uma redução de 13,8% na distância total. Isso mostra que o estudo sobre as roteirizações, até mesmo em casos como o Cenário 3, prova-se mais uma vez muito importante nesse projeto.

Sendo assim, o Cenário 3 revela que a consideração sobre os pontos de retirada referentes a rios provoca um obstáculo na otimização das roteirizações, indicando que é importante a realização de mais estudos sobre essa restrição. É necessário ponderar a necessidade de economia nesse caso, uma vez que outras medidas são necessárias para se proporcionar uma redução nas distâncias após a adição dessa restrição. Pode-se considerar uma maior flexibilidade na retirada de água de rios ou até mesmo a construção de novas estações de tratamento de água.

4.4 Visão geral

De maneira geral, pode-se dizer que a otimização das roteirizações em todos os cenários teve um impacto relevante, mostrando-se necessário o uso da ferramenta de otimização das rotas na Operação Carro-Pipa.

Realizando uma avaliação do Cenário 1 para os estados do Ceará e do Piauí conjuntamente, e usando para este último estado a média ocorrida no intervalo de tempo delimitado, é possível encontrar os resultados apresentados na tabela 11 abaixo.

Tabela 11 – Resultado do Cenário 1 para os estados do Ceará e do Piauí

Estado	Distância total realizada (10 ³ km)	Distância total otimizada (10 ³ km)	Economia absoluta (10 ³ km)	Economia relativa
Ceará	1.085	1.018	67	6,2%
Piauí (média)	6.571	5.776	795	12,1%
Total	7.656	6.794	862	11,3%

Fonte: O AUTOR

Nota-se que ao comparar os estados simultaneamente, a economia encontrada continua com um valor elevado, indicando que, para o Cenário 1, uma aplicação a toda a Região Nordeste tem grandes chances de continuar com esse impacto positivo.

Já ao analisar apenas o estado do Piauí, mas realizando uma comparação entre os três cenários de aplicação, é possível chegar à tabela 12 abaixo.

Tabela 12 – Comparação entre os cenários 1, 2 e 3 para o estado do Piauí

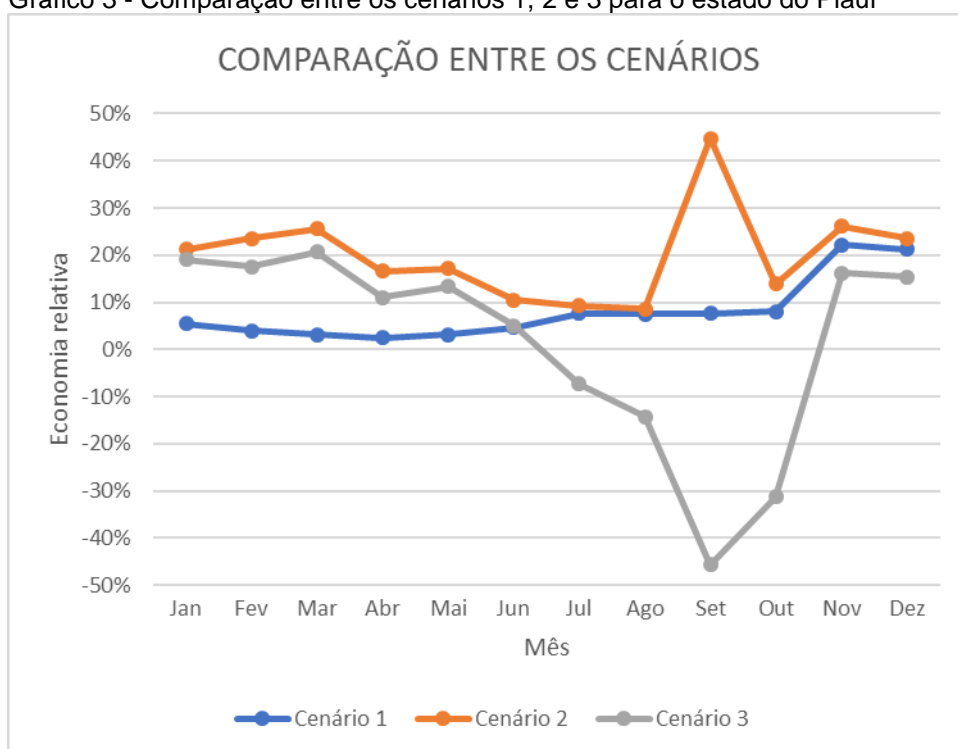
Ano	Mês	Economia relativa (Cenário 1)	Economia relativa (Cenário 2)	Economia relativa (Cenário 3)
2017	Janeiro	5,5%	21,2%	19,1%
	Fevereiro	4,0%	23,6%	17,5%
	Março	3,1%	25,6%	20,7%
	Abril	2,5%	16,6%	11,1%
	Maio	3,1%	17,2%	13,3%
	Junho	4,7%	10,5%	5,1%
	Julho	7,6%	9,3%	-7,3%
	Agosto	7,5%	8,6%	-14,3%

Continua

Ano	Mês	Economia relativa (Cenário 1)	Economia relativa (Cenário 2)	Economia relativa (Cenário 3)
2017	Setembro	7,6%	44,7%	-45,7%
	Outubro	8,0%	13,9%	-31,2%
	Novembro	22,2%	26,2%	16,2%
	Dezembro	21,2%	23,6%	15,4%
Total		10,1%	20,3%	-6,5%

Fonte: O AUTOR

Gráfico 3 - Comparação entre os cenários 1, 2 e 3 para o estado do Piauí



Fonte: O AUTOR

Uma comparação entre os três cenários revela que o de melhor impacto na economia foi o Cenário 2, apresentando o melhor resultado em todos os meses de aplicação. Isso deve-se ao fato de que, em relação ao Cenário 1, foi desenvolvida para esse cenário uma maior flexibilidade na escolha dos pontos de abastecimento, assim como uma nova delimitação das capacidades de retirada. Já em relação ao Cenário 3, a ausência da restrição em relação à água proveniente de rios também permite uma maior flexibilidade na escolha de rotas de entrega de menor distância, promovendo uma roteirização mais econômica.

Ao comparar o Cenário 1 e o Cenário 3, é possível notar que, embora este último cenário apresente um rendimento geral pior do que o primeiro, a economia nos meses em que houve melhoria de roteirização (13,8%) alcançou uma média maior de redução do que o próprio Cenário 1. Isso se deve ao fato de que, embora a adição da restrição relativa aos rios proporcione um aumento de distância de entrega para alguns casos, a flexibilidade geral para os pontos de retirada e suas capacidades, semelhante ao que ocorreu no Cenário 2, proporciona uma redução de distância para outros casos.

É importante mencionar que, apesar de o Cenário 3 não realizar em todos os meses uma real economia, ele proporciona uma minimização de custos para um caso de bastante benefício social. Esse benefício consiste na garantia de entrega para a população necessitada a maior quantidade possível de água nas melhores condições de tratamento, estimulando o desenvolvimento de um maior bem-estar e de uma melhor saúde coletiva.

Sendo assim, pode-se chegar à conclusão de que, além de ser necessária a aplicação de uma ferramenta de otimização na Operação Carro-Pipa, também é necessário considerar dois fatores. O primeiro fator é o desenvolvimento da maior flexibilidade possível na escolha dos pontos de retirada de água, a fim de facilitar a minimização das rotas. Já o segundo fator diz respeito à restrição das retiradas dos pontos relativos a rios. Essa restrição provoca uma tendência média de aumento nas distâncias das rotas e isso leva à ponderação entre a necessidade dessa restrição e a necessidade de economia para o projeto, pois caso a redução de custos seja importante, outras medidas devem ser levadas em consideração. Por exemplo, é possível tanto promover uma maior flexibilidade na retirada de águas desses pontos quanto também é possível avaliar o impacto econômico a longo prazo de se construir açudes ou estações de tratamento de água em locais cuja proximidade aos rios é maior do que a outros tipos de fonte de água.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo promover uma ferramenta de otimização das rotas de distribuição de água da Operação Carro-Pipa para os estados do Ceará e do Piauí. Para este último estado, ainda foram desenvolvidos diferentes cenários de aplicação da ferramenta, a fim de avaliar a influência de diferentes fatores relacionados aos pontos de retirada de água.

A ferramenta foi desenvolvida e encontrou-se um resultado de economia positiva e satisfatória para todos os casos dos dois estados nos dois primeiros cenários de aplicação, mas de prejuízo de alguns casos no terceiro cenário. Entretanto esse prejuízo no Cenário 3 deve-se à restrição de retirada mínima de pontos referentes a água de rios e açudes e isso leva ao questionamento tanto da flexibilidade que pode ser aplicada a essa restrição quanto à busca por novas medidas públicas que possam reduzir o custo geral de oferta de água proveniente de outras fontes diferente de rios e açudes. De qualquer maneira, esses casos em que não houve uma real economia proporcionam uma minimização de custos para um cenário de benefício social. Esse benefício consiste na garantia de entrega para a população necessitada a maior quantidade possível de água nas melhores condições de tratamento, estimulando o desenvolvimento de um maior bem-estar e de uma melhor saúde coletiva.

Pode-se dizer, portanto, que todos os resultados encontrados reafirmam a necessidade da ferramenta de otimização das rotas de distribuição de água na Operação Carro-Pipa, uma vez que foram encontradas diversas oportunidades de economia e benefícios que, para um projeto com o orçamento anual aproximado de R\$ 1 bilhão, têm um impacto bastante expressivo.

A economia com essa operação ajuda a promover uma redução relevante nos gastos públicos, o que se mostra extremamente necessário na situação socioeconômica atual do país. Essa redução de custos em operações diligentes permite que, mantendo o mesmo resultado, mais recursos possam ser realocados para áreas bastante frágeis em nosso país, como Saúde, Educação e Segurança.

Ademais, para o próprio projeto, ainda existem aplicações a serem desenvolvidas em trabalhos futuros. Uma delas é a aplicação da otimização para os outros estados da operação Carro-Pipa, a fim de se obter uma solução mais precisa de todo o projeto. Outra medida é a aplicação da otimização não para cada estado

individualmente, mas também para toda a Região Nordeste de uma só vez. Isso garantiria a melhor seleção de distribuição para os pontos de retirada próximos a fronteiras entre estados.

Outra proposta é o desenvolvimento de estudos de viabilidade sobre a construção de novas estações de tratamento de água, a fim de contornar a restrição de minimização de retirada de água em pontos referentes a rios e açudes, garantindo uma redução geral de custos. Por fim, também é possível avaliar a possibilidade de remoção da restrição do problema que diz respeito às entregas para cada ponto de abastecimento serem realizadas por apenas um ponto de retirada. Sem essa restrição, seria possível uma maior flexibilidade para a roteirização, promovendo uma economia ainda maior à Operação Carro-Pipa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. "**Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**", 2017. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/relatorio-conjuntura-2017.pdf>. Acesso em: 21/06/2019.

BRASIL, Governo do. "**Governo aumenta em 14% recursos a carros-pipa**", 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2016/11/governo-aumenta-em-14-recursos-a-carros-pipa>. Acesso em: 21/06/2019.

DANTZIG, George B.; RAMSER, John H. **The truck dispatching problem**. Management science, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

DANTZIG, George B.; THAPA, Mukund N. **Linear Programming 1: Introduction**. New York: Springer-Verlag New York, 1997.

FRAZZOLI, Emilio; BULLO, Francesco. **Decentralized algorithms for vehicle routing in a stochastic time-varying environment**. In: 2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2004. p. 3357-3363.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R. **A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos**, 2015. Disponível em: http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/796/728#page=109. Acesso em: 21/06/2019.

MATHWORKS. "**MATLAB Product Description**", 2019. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html. Acesso em: 21/06/2019.

MINISTÉRIO DA DEFESA. "**Defesa e Integração vão construir mais de 2.500 poços artesianos na região Nordeste**", 2016. Disponível em: <https://www.defesa.gov.br/index.php/noticias/21514-jungmann-anuncia-construcao-de-2-500-pocos-artesianos-na-regiao-nordeste>. Acesso em: 21/06/2019.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. "**Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres - CENAD**", 2019. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/defesa-civil/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad>. Acesso em: 21/06/2019.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. "**Conheça o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR)**", 2019. Disponível em: http://mi.gov.br/area-de-imprensa/todas-as-noticias/-/asset_publisher/YEkzzDUSRvZi/content/conheca-o-novo-ministerio-do-desenvolvimento-regional-mdr-?inheritRedirect=false. Acesso em: 21/06/2019.

OLIVEIRA, Humberto César Brandão de; VASCONCELOS, Germano Crispim. **A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows**. Annals of Operations Research, v. 180, n. 1, p. 125-144, 2010.

PSARAFTIS, Harilaos N. **Dynamic vehicle routing problems**. Vehicle routing: Methods and studies. North-Holland, 1988.

SUASSUNA, J. "**A Água no Semiárido Brasileiro: potencialidades e limitações**", 2012. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2012/07/26/a-agua-no-semiarido-brasileiro-potencialidades-e-limitacoes-artigo-de-joao-suassuna/>. Acesso em: 21/06/2019.

WINSTON, Wayne L.; GOLDBERG, Jeffrey B. **Operations research: applications and algorithms**. Belmont e Calif Calif: Thomson/Brooks/Cole, 2004.

TAHA, Hamdy A. **Operations research: an introduction**. Pearson/Prentice Hall, 2011.

APÊNDICE A – CÓDIGO EM MATLAB DO MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO

Figura 1 - Código em MATLAB (parte 1/3)

19/06/19 12:34 C:\User...\otimizar rota v4 sent 26 OCT.m 1 of 3

```
function otimizar_rota_v4

%Matriz de distâncias total e os identificadores gerais de demanda e oferta
distanciasparcial = dlmread('distancias.txt');
for i = 1:(size(distanciasparcial,1)-1)
    total_demanda_name(i,1) = int32(distanciasparcial(i+1,1));
end
for i = 1:(size(distanciasparcial,2)-1)
    total_oferta_name(i,1) = int32(distanciasparcial(1,i));
end
for i = 1:(size(distanciasparcial,1)-1)
    for j = 1:(size(distanciasparcial,2)-1)
        total_distancias(i,j) = double(distanciasparcial(i+1,j+1));
    end
end

%Matriz de demanda e seu identificador
demandaparcial = dlmread('demanda.txt');
n_demanda = size(demandaparcial,1);
for i = 1:n_demanda
    demanda_name(i,1) = int32(demandaparcial(i,1));
    demanda(i,1) = double(demandaparcial(i,2));
end

%Matriz de oferta e seu identificador
ofertaparcial = dlmread('oferta.txt');
n_oferta = size(ofertaparcial,1);
for i = 1:n_oferta
    oferta_name(i,1) = int32(ofertaparcial(i,1));
    oferta(i,1) = double(ofertaparcial(i,2));
end

%Matriz de distâncias do caso específico
for i = 1:n_demanda
    for j = 1:n_oferta
        distancias(i,j) = total_distancias(find(total_demanda_name == demanda_name(i,1), find(total_oferta_name == oferta_name(j,1))));
    end
end

%f
for i = 1:n_demanda
    for j = 1:n_oferta
        f(j+(i-1)*n_oferta,1) = distancias(i,j)*demanda(i,1);
    end
end

%intcon
intcon = [1:n_oferta*n_demanda];

%A
for i = 1:n_oferta
    for j = 1:n_demanda
        A(i,i+(j-1)*n_oferta) = demanda(j,1);
    end
end
```

Fonte: O AUTOR

Figura 2 - Código em MATLAB (parte 2/3)

19/06/19 12:34 C:\User...\otimizar rota v4 sent 26 OCT.m 2 of 3

```

    end
end

%b
for i = 1:n_oferta
    b(i,1) = oferta(i,1);
end

%Aeq
for i = 1:n_demanda
    i
    for j = 1:n_oferta
        Aeq(i,j+(i-1)*n_oferta)=1;
    end
end

%beq
for i = 1:n_demanda
    beq(i,1) = 1;
end

%lb
for i = 1:n_oferta*n_demanda
    lb(i) = 0;
end

%ub
for i = 1:n_oferta*n_demanda
    ub(i) = 1;
end

%Resultado
[x,fval,exitflag,output] = intlinprog(f,intcon,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

options = optimoptions('intlinprog','AbsoluteGapTolerance',0.1,'ConstraintTolerance',1e-3,
'IntegerTolerance',1e-3,'MaxTime',26600,'RelativeGapTolerance',1e-2);
[x,fval]=intlinprog(f,intcon,[],[],Aeq,beq,lb,[],options)
teste=1
%Resultado
[x,fval,exitflag,output] = intlinprog(f,intcon,A,b,Aeq,beq,lb,ub,options);

for i = 1:n_demanda
    for j = 1:n_oferta
        resultadoparc(i,j) = round(x(j+(i-1)*n_oferta,1));
    end
end

resultado = demanda_name;
for i = 1:n_demanda
    resultado(i,2) = oferta_name(find(resultadoparc(i,:)==1));
end

resultadotxt = fopen('resultado.txt','w');
fprintf(resultadotxt,'%s\t%s\r\n','PA','MAN');
for i = 1:n_demanda

```

Fonte: O AUTOR

Figura 3 - Código em MATLAB (parte 3/3)

19/06/19 12:34 C:\User...\otimizar rota v4 sent 26 OCT.m 3 of 3

```

    fprintf(resultadotxt,'%u\t%u\r\n',resultado(i,1),resultado(i,2));
end
fclose(resultadotxt);

soma_otimizado=0;
for i = 1:n_demanda
    soma_otimizado = soma_otimizado + (demanda(i,1)*distancias(i,find(
(oferta_name==resultado(i,2)))))/1000;
end

soma_otimizado

%Matriz de situação atual
atualparcial = dlmread('atual.txt');
n_atual = size(atualparcial,1);

soma_atual=0;
for i = 1:n_atual
    soma_atual = soma_atual + (atualparcial(i,3)*distanciasparcial(find(
(total_demanda_name==int32(atualparcial(i,1))),find(total_oferta_name==int32(
(atualparcial(i,2))))) )/1000;
end

economiaperc = 100*(1-(soma_otimizado/soma_atual));

soma_atual = int32(soma_atual);
soma_otimizado = int32(soma_otimizado);

economiatxt = fopen('economia.txt','w');
fprintf(resultadotxt,'ATUAL (km): %d\r\n', soma_atual);
fprintf(resultadotxt,'OTIMIZADO (km): %d\r\n', soma_otimizado);
fprintf(resultadotxt,'ECONOMIA: %.2f%%\r\n', economiaperc);
fclose(economiatxt);

end

```

Fonte: O AUTOR

APÊNDICE B – RESULTADO PARA O CENÁRIO 1 DO MUNICÍPIO DE QUIXADÁ

Relação dos pontos de abastecimento (PA) e seus respectivos pontos de retirada (PR) para a solução ótima:

Tabela 13 – Resultado para o Cenário 1 do município de Quixadá

PA	PR	PA	PR	PA	PR
2655	2703	18390	100	47087	2703
18309	2715	18393	100	47088	100
18310	2715	18409	100	47120	2715
18316	2715	18411	2703	47233	2715
18318	2715	18412	2715	57191	100
18319	2703	18416	100	57197	2703
18322	2703	18420	100	72542	2715
18324	2715	18421	100	72544	100
18332	100	18424	100	72942	2715
18338	2703	18425	100	72946	2703
18345	100	18432	2715	73159	2715
18347	2715	18433	2715	73160	100
18349	2715	18435	2715	73165	100
18354	100	18438	100	88318	2703
18355	2715	18442	2703	88322	100
18359	100	18444	100	88328	100
18363	100	18453	2715	88357	100
18365	2715	24347	2703	88370	100
18366	2715	37319	100	88389	100
18367	2715	37331	100	88566	2703
18368	2715	37340	2703	88641	100
18372	2715	46732	2703	88649	2703
18374	2715	46997	2715	88655	100
18376	2715	47056	2703	88656	100
18386	2715	47083	100	88657	100
18388	100	47084	100	88659	2715

Continua

PA	PR	PA	PR	PA	PR
88661	100	88980	2715	127346	100
88690	100	88993	100	127347	2715
88691	2715	89004	2715	127352	100
88699	100	89024	100	127356	2715
88705	2715	89027	2715	127364	2703
88707	2715	89032	100	127365	2715
88724	100	89056	100	127366	2715
88740	100	89066	2703	127367	2715
88747	100	90591	100	127451	100
88756	100	90777	100	127533	100
88758	100	92942	2715	128423	100
88761	100	93721	2715	128622	2703
88763	100	93723	100	128625	2703
88767	100	93726	100	129325	100
88769	2715	111097	2715	129737	2715
88788	100	111759	100	129738	2703
88812	2703	112789	100	129739	2715
88814	2703	114017	2715	129755	2715
88816	2715	114021	2715	129818	2715
88818	2715	114022	2715	129849	100
88858	2715	114025	2715	130739	2703
88859	2715	114044	2715	130808	100
88862	100	114074	100	132099	100
88865	2715	114253	2715	134732	2703
88868	100	114254	100	138690	100
88904	2715	116363	100	138691	100
88913	2715	116366	100	138695	2715
88927	100	118723	100	138699	2703
88950	100	118724	100	138702	100
88958	2715	118725	100	138703	100
88965	2715	127344	100	139479	100

Continua

PA	PR	PA	PR	PA	PR
139480	100	147210	100	151164	2715
140091	2715	147222	2703	151165	2703
143447	100	147223	100	154369	2703
146664	100	147225	100	154758	2715
146696	2715	147227	100	154780	100
146954	100	147878	100	156828	2715
146958	2715	148419	100	156971	100
146959	2715	148420	2715	156977	2715
146978	100	149276	100	156984	100
146984	2715	149284	100	156985	100
147005	2703	149287	100	157030	100
147014	2715	150086	100	157157	100
147016	100	150091	100	190349	2715
147020	100	150560	100	399350	100
147050	100	150564	2703	399452	100
147051	100	150565	2715	465969	100
147053	100	150608	100	466262	100
147204	2715	150609	100	467441	2703
147205	2715	150610	2703		
147207	2703	151113	100		

Fonte: O AUTOR

ANEXO – DADOS RECEBIDOS PARA O CENÁRIO 1 DO MUNICÍPIO DE QUIXADÁ

Relação entre os pontos de abastecimento (PA) e suas respectivas necessidades de entrega:

Tabela 14 – Necessidades de entrega para o Cenário 1 do município de Quixadá

PA	Entregas	PA	Entregas	PA	Entregas
2655	2	18388	4	47083	4
18309	3	18390	2	47084	2
18310	1	18393	6	47087	1
18316	1	18409	2	47088	4
18318	2	18411	1	47120	1
18319	2	18412	2	47233	2
18322	2	18416	5	57191	1
18324	3	18420	4	57197	1
18332	4	18421	2	72542	2
18338	6	18424	5	72544	1
18345	4	18425	1	72942	2
18347	3	18432	3	72946	3
18349	2	18433	1	73159	5
18354	3	18435	3	73160	1
18355	1	18438	5	73165	2
18359	1	18442	2	88318	5
18363	1	18444	4	88322	1
18365	2	18453	6	88328	5
18366	1	24347	4	88357	1
18367	1	37319	1	88370	3
18368	2	37331	1	88389	3
18372	2	37340	6	88566	4
18374	1	46732	1	88641	1
18376	3	46997	1	88649	1
18386	7	47056	5	88655	9

Continua

PA	Entregas	PA	Entregas	PA	Entregas
88656	12	88950	1	118724	6
88657	2	88958	2	118725	3
88659	2	88965	2	127344	5
88661	1	88980	2	127346	5
88690	1	88993	1	127347	1
88691	5	89004	2	127352	1
88699	1	89024	1	127356	2
88705	5	89027	1	127364	5
88707	1	89032	1	127365	4
88724	2	89056	2	127366	2
88740	3	89066	5	127367	3
88747	2	90591	2	127451	3
88756	4	90777	1	127533	3
88758	5	92942	1	128423	4
88761	3	93721	1	128622	8
88763	2	93723	1	128625	5
88767	2	93726	2	129325	6
88769	1	111097	1	129737	3
88788	1	111759	1	129738	1
88812	4	112789	3	129739	1
88814	2	114017	2	129755	2
88816	3	114021	10	129818	5
88818	5	114022	4	129849	1
88858	1	114025	2	130739	1
88859	3	114044	1	130808	1
88862	1	114074	4	132099	1
88865	1	114253	1	134732	2
88868	1	114254	2	138690	4
88904	1	116363	1	138691	3
88913	3	116366	3	138695	5
88927	1	118723	3	138699	2

Continua

PA	Entregas	PA	Entregas	PA	Entregas
138702	5	147205	3	151113	1
138703	5	147207	2	151164	2
139479	1	147210	12	151165	3
139480	4	147222	5	154369	1
140091	3	147223	4	154758	4
143447	1	147225	4	154780	2
146664	4	147227	8	156828	2
146696	7	147878	4	156971	1
146954	2	148419	4	156977	12
146958	4	148420	2	156984	2
146959	1	149276	1	156985	7
146978	4	149284	2	157030	2
146984	2	149287	7	157157	1
147005	4	150086	1	190349	1
147014	1	150091	2	399350	4
147016	7	150560	3	399452	2
147020	7	150564	1	465969	12
147050	15	150565	3	466262	1
147051	4	150608	1	467441	1
147053	2	150609	5		
147204	3	150610	3		

Fonte: O AUTOR

Relação entre os pontos de retirada e suas respectivas capacidades de retirada:

Tabela 15 – Capacidades de retirada para o Cenário 1 do município de Quixadá

PR	Capacidade
100	ilimitada
2703	101
2715	204

Fonte: O AUTOR

Distâncias entre os pontos de abastecimento e os pontos de retirada:

Tabela 16 – Distâncias, em metros, para o Cenário 1 do município de Quixadá

PA	PR			PA	PR		
	100	2703	2715		100	2703	2715
2655	43.277	14.061	29.550	18393	18.137	14.395	29.143
18309	54.804	25.461	9.752	18409	19.892	13.375	29.735
18310	49.511	20.168	4.459	18411	38.276	12.268	27.756
18316	55.355	26.013	10.303	18412	42.260	11.370	19.733
18318	51.892	22.566	23.806	18416	49.512	36.461	40.304
18319	36.766	6.284	21.773	18420	64.471	54.917	58.760
18322	39.838	10.621	26.110	18421	40.322	30.943	40.786
18324	48.591	19.375	29.539	18424	48.223	38.844	48.686
18332	25.914	14.362	30.722	18425	59.910	48.574	51.445
18338	43.920	14.704	30.192	18432	43.616	18.200	19.926
18345	47.412	34.115	42.506	18433	41.620	16.203	21.815
18347	37.198	12.088	21.931	18435	49.258	18.368	26.731
18349	38.677	13.260	21.278	18438	21.394	11.873	28.233
18354	53.864	44.485	53.040	18442	38.977	12.969	28.458
18355	54.914	37.309	41.151	18444	51.267	39.931	43.774
18359	34.897	24.285	34.128	18453	43.251	22.223	27.536
18363	69.747	58.753	62.027	24347	42.926	13.709	29.134
18365	42.316	16.899	22.383	37319	18.232	13.551	28.299
18366	43.866	18.450	21.001	37331	37.104	17.049	26.892
18367	44.240	18.824	21.557	37340	38.357	9.141	24.629
18368	45.594	26.394	30.237	46732	76.794	26.575	46.260
18372	52.885	25.212	26.452	46997	47.781	26.413	27.653
18374	42.896	13.571	12.939	47056	34.384	8.687	20.619
18376	44.010	14.685	14.053	47083	46.399	37.019	46.862
18386	39.049	8.159	16.521	47084	40.552	22.207	28.662
18388	9.556	22.992	37.739	47087	35.122	6.208	18.139
18390	17.401	13.607	28.354	47088	4.212	28.660	43.408

Continua

PA	PR			PA	PR		
	100	2703	2715		100	2703	2715
47120	49.458	20.241	30.406	88707	48.608	17.718	26.081
47233	49.200	28.633	30.284	88724	14.033	41.712	54.589
57191	52.027	39.344	43.187	88740	23.509	15.149	31.509
57197	33.314	10.078	26.151	88747	49.911	41.150	50.992
72542	42.390	13.065	14.305	88756	9.144	26.087	40.834
72544	24.804	20.145	33.022	88758	9.811	26.372	41.502
72942	42.891	17.474	21.819	88761	10.122	25.461	41.691
72946	36.380	5.490	19.185	88763	9.751	25.925	41.442
73159	49.960	20.744	30.908	88767	3.313	27.674	42.422
73160	40.830	26.428	35.824	88769	49.036	18.146	26.508
73165	69.829	58.835	60.529	88788	44.072	30.775	40.171
88318	34.829	4.347	19.835	88812	34.894	9.477	21.409
88322	41.245	31.865	41.708	88814	35.273	9.856	21.236
88328	42.913	33.534	43.377	88816	43.473	18.210	21.450
88357	43.693	29.292	36.757	88818	46.480	15.590	23.953
88370	53.686	44.307	52.135	88858	48.294	19.078	28.528
88389	51.269	39.933	43.776	88859	52.122	34.517	38.360
88566	35.846	5.364	20.853	88862	27.127	16.829	29.706
88641	18.072	15.195	31.555	88865	56.045	26.720	11.469
88649	36.802	6.320	21.808	88868	30.952	10.764	27.124
88655	9.421	26.289	41.112	88904	36.375	7.050	13.374
88656	9.346	26.238	41.037	88913	42.794	21.766	27.079
88657	14.461	22.929	37.677	88927	35.252	19.474	29.317
88659	46.483	17.158	17.614	88950	17.555	26.320	39.197
88661	15.768	24.236	38.983	88958	48.262	17.371	25.734
88690	20.185	11.598	26.346	88965	52.473	23.131	7.421
88691	40.399	11.057	5.608	88980	52.209	22.867	6.474
88699	24.684	7.606	22.354	88993	49.327	33.773	37.615
88705	44.913	14.023	22.385	89004	48.008	19.157	20.397

Continua

PA	PR			PA	PR		
	100	2703	2715		100	2703	2715
89024	46.802	33.504	39.764	127347	48.442	20.012	21.253
89027	48.006	19.159	20.399	127352	52.242	38.525	42.367
89032	46.597	37.218	44.653	127356	39.139	8.249	16.612
89056	7.261	33.456	48.203	127364	44.443	15.227	30.716
89066	94.401	70.321	87.104	127365	39.146	14.037	23.879
90591	16.644	27.230	40.107	127366	39.220	14.427	24.270
90777	69.934	58.940	61.765	127367	44.552	13.662	22.024
92942	38.786	8.108	13.082	127451	14.702	29.172	42.049
93721	51.009	21.684	22.924	127533	47.819	39.057	48.900
93723	39.586	18.824	34.313	128423	38.342	19.657	35.146
93726	28.095	6.883	23.243	128622	42.791	13.575	27.491
111097	51.445	22.103	6.393	128625	86.822	28.389	54.489
111759	13.072	20.166	34.914	129325	10.209	40.416	53.293
112789	24.662	7.628	22.376	129737	40.608	9.717	18.080
114017	48.056	18.713	6.677	129738	42.434	13.218	28.706
114021	46.375	15.545	23.907	129739	49.120	18.230	26.592
114022	49.660	20.443	30.608	129755	36.173	6.830	10.117
114025	44.224	13.334	21.696	129818	44.948	23.920	28.349
114044	49.095	18.205	26.567	129849	27.314	12.961	29.321
114074	36.965	32.256	42.099	130739	39.583	10.367	25.856
114253	43.819	19.254	21.988	130808	14.140	42.285	55.162
114254	14.372	22.623	38.983	132099	5.413	36.401	51.149
116363	14.715	29.159	42.036	134732	35.848	6.933	18.865
116366	14.702	29.172	42.049	138690	13.030	33.843	46.720
118723	40.194	30.815	40.657	138691	4.443	26.545	41.293
118724	41.220	31.840	41.683	138695	50.540	21.324	31.488
118725	50.232	40.852	50.695	138699	42.048	12.832	28.320
127344	9.410	26.353	41.100	138702	25.782	11.316	27.676
127346	25.563	16.129	32.489	138703	26.441	10.769	27.129

Continua

PA	PR			PA	PR		
	100	2703	2715		100	2703	2715
139479	51.290	39.954	43.796	149276	18.715	26.366	39.243
139480	5.829	32.024	46.771	149284	15.649	35.525	48.402
140091	46.053	15.163	23.526	149287	12.923	36.335	49.212
143447	47.672	38.293	44.880	150086	27.777	10.332	23.400
146664	47.058	35.304	43.695	150091	59.829	45.098	46.782
146696	38.822	15.580	25.422	150560	45.251	35.872	45.715
146954	46.534	37.155	46.998	150564	30.480	3.184	19.544
146958	45.130	15.914	25.892	150565	35.530	6.188	10.205
146959	44.968	15.752	25.530	150608	51.255	39.919	43.762
146978	10.732	36.927	51.674	150609	55.027	42.934	46.777
146984	39.244	14.403	24.246	150610	39.261	10.045	25.533
147005	34.728	9.248	24.736	151113	38.050	32.711	42.554
147014	40.857	9.967	18.330	151164	46.341	15.451	23.813
147016	34.531	19.874	29.717	151165	46.447	17.231	32.720
147020	31.529	21.231	33.795	154369	36.363	5.881	19.624
147050	8.830	35.024	49.772	154758	54.226	24.901	13.402
147051	11.052	37.247	51.994	154780	23.048	7.940	22.687
147053	47.769	39.008	48.850	156828	53.463	24.138	8.886
147204	37.686	6.796	15.143	156971	51.915	42.536	46.901
147205	40.924	10.034	18.396	156977	34.540	5.197	11.463
147207	35.945	8.031	23.519	156984	15.748	38.427	51.304
147210	35.145	20.488	30.330	156985	7.253	29.267	44.015
147222	76.688	39.319	70.296	157030	14.715	29.159	42.036
147223	38.345	19.652	35.140	157157	51.953	41.180	45.022
147225	39.484	20.762	36.251	190349	51.399	20.509	28.872
147227	39.484	20.762	36.251	399350	19.658	15.916	30.664
147878	45.344	28.762	61.482	399452	23.223	9.067	23.815
148419	48.830	35.209	39.052	465969	19.872	51.295	83.253
148420	45.158	15.942	25.340	466262	25.115	11.155	27.515

Continua

PA	PR		
	100	2703	2715
467441	36.462	8.925	24.413

Fonte: O AUTOR